

学校编码: 10384  
学号: 200231042

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_  
UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学  
硕 士 学 位 论 文

地震初至波走时层析成像方法研究

Research on Seismic First Arrival Wave Traveltime  
Tomography

谢 华 雯

指导教师姓名: 吉国力 教 授

专 业 名 称: 系 统 工 程

论文提交日期: 2 0 0 5 年 6 月

论文答辩时间: 2 0 0 5 年 6 月

学位授予日期: 2 0 0 5 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2005 年 6 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文而产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

## 摘 要

地震层析成像是一种利用观测到的穿过地球内部的地震波的运动学和动力学特征,获得地球内部介质物性信息的重要地球物理方法。随着相关理论方法以及工具设备的不断发展,这项技术已经广泛应用于工程和资源勘探等许多领域,并取得了可喜的成果。本论文以地震层析成像技术的一个重要分支——地震初至波走时层析成像方法为研究对象,深入探讨了走时层析成像过程中的两个核心步骤即正演模拟(射线追踪)与反演成像。

首先,论文研究了地震射线追踪算法,对目前较为流行的几种地震初至波射线追踪算法进行了对比分析,指出其存在的问题。将目前在国内相关领域中尚未得到应用的谱梯度算法(SG)引入地震射线追踪问题中,提出了基于 SG 算法的射线追踪方法。仿真结果显示,本文提出的新方法计算所得的射线路径分布更加均匀,精度更高,而且其收敛性与初始猜测值无关,整体效果优于目前较为常用的最小走时射线路径算法以及传统的 CG 算法。

其次,论文深入研究了地震走时层析成像方法,对比分析了目前较为流行的几种层析反演算法,而后重点探讨了基于遗传算法的走时层析反演方法,在本文提出的基于 SG 算法的射线追踪方法的基础上,结合井间层析反演问题的特点采用实数编码,定义了新的变异算子,同时引入平滑处理,提出了基于遗传算法的井间地震走时层析反演方法,针对遗传算法存在的局部搜索能力较弱、收敛较慢的问题,我们又引入常用的共轭梯度法,将其与遗传算法有机结合,进而提出了基于遗传算法和共轭梯度法的混合走时反演方法,仿真实验证明新方法的成像效果较之传统的共轭梯度反演方法以及遗传反演方法更为优越。

最后,针对本文提出的正反演算法以及几种目前较为常用的算法,编制了二维层析成像软件。用户可方便地选择不同算法,进行不同组合,对各种不同的算法以及算法组合方式进行对比研究。应用结果表明,该软件界面友好,性能稳定,具备较高的实用价值。

**关键词:** 地震层析成像; 射线追踪; 反演

## ABSTRACT

Seismic tomography is an important geophysical method which can retrieve physical information inside the earth using the kinematics and dynamics data of seismic wave. With the development of related theories and equipments, this technology has been extensively applied in many fields as resource exploration etc. The paper focuses on an important branch of the technology which is seismic first arrival traveltimes tomography and do research mainly on the two core steps of it that is ray tracing and tomography inversion.

Firstly, the paper analyzes the status quo of seismic ray tracing and points out the defects of present methods. To improve the accuracy of ray tracing, the paper introduces a new ray tracing method based on SG algorithm. Simulation results show that the new method does better than traditional CG algorithm and least traveltimes algorithm in traveltimes and ray path. What's more, the accuracy of the new algorithm doesn't depend on a close initial ray path which is the case in CG algorithm.

Secondly, the paper analyzes the status quo of seismic traveltimes tomography. To improve the resolution of tomography results, the paper introduces a seismic traveltimes tomography method based on the new ray tracing method mentioned above which uses GA to solve the inversion problem. Regarding the features of cross-well seismic tomography, a new aberrance operator is introduced in the GA inversion method together with smoothing process. To improve the local search ability of the new inversion algorithm, a CG algorithm is embedded in it which forms a mixed tomography method. The simulation results show that the mixed tomography algorithm does better than the traditional CG and GA in the resolution of tomography.

At last, the paper describes the design and implementation of a 2D tomography software which is based on the new ray tracing method and tomography inversion methods introduced in this paper and some typical ones. The users can easily choose various ray tracing methods and inversion methods and compares the performance of each one through simulation. In addition to that, the software also provides the edit function for velocity model which enables users to apply various methods to various velocity models. The application results show that, it's a practical software with friendly human-machine interface and high performance.

**Key words:** Seismic Tomography; Ray Tracing; Inversion

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 地震层析成像简介 .....	1
1.1.1 地震层析成像的概念 .....	1
1.1.2 地震层析成像的分类 .....	1
1.1.3 地震层析成像的存在的问题 .....	2
1.2 地震层析成像的发展概况 .....	3
1.2.1 地震层析成像的发展历史 .....	3
1.2.2 地震层析成像的研究现状 .....	5
1.2.3 地震层析成像研究展望 .....	7
1.3 本论文的研究内容和意义 .....	7
1.3.1 研究内容 .....	7
1.3.2 研究意义 .....	8
1.4 本文组织结构 .....	9
第 2 章 地震层析成像正反演理论基础 .....	10
2.1 地震层析反演问题概述 .....	10
2.1.1 地震层析反演的数学理论基础 .....	10
2.1.2 地球物理反演问题的一般性描述 .....	11
2.1.3 地震层析反演问题的求解 .....	12
2.2 地震层析反演方法概述 .....	14
2.2.1 拟线性化反演方法 .....	14
2.2.2 完全非线性反演方法 .....	15
2.2.3 混合最优化反演方法 .....	17
2.3 小结 .....	18
第 3 章 地震初至波射线追踪算法研究 .....	19
3.1 射线追踪算法概述 .....	19
3.2 最小走时射线路径算法 .....	22
3.3 基于谱梯度算法的射线追踪方法 .....	23
3.3.1 谱梯度算法概述 .....	23

3.3.2 基于谱梯度算法的射线追踪方法.....	24
3.4 基于 CG 的射线追踪算法.....	26
3.5 仿真实例 .....	27
3.6 仿真结果分析.....	32
3.7 对两种梯度算法收敛性的讨论.....	32
3.8 小结.....	33
<b>第 4 章 基于遗传算法的地震层析反演方法研究.....</b>	<b>35</b>
4.1 遗传算法(GA)基础 .....	35
4.1.1 遗传算法原理.....	35
4.1.2 遗传算法的基本要素.....	35
4.1.3 遗传算法的基本操作.....	36
4.1.4 遗传算法的基本步骤.....	37
4.2 基于遗传算法的井间地震层析反演方法 .....	38
4.2.1 问题描述.....	38
4.2.2 方法原理.....	39
4.2.3 算法步骤.....	44
4.3 共轭梯度反演方法 .....	47
4.3.1 目标函数及其梯度.....	47
4.3.2 具体步骤.....	47
4.4 基于遗传算法与共轭梯度法的混合反演方法.....	48
4.5 仿真实例 .....	49
4.6 小结.....	54
<b>第 5 章 走时层析成像软件的设计与实现.....</b>	<b>55</b>
5.1 系统的主要功能与整体结构 .....	55
5.2 软件设计与实现.....	56
5.3 小结 .....	60
<b>第 6 章 总结与展望 .....</b>	<b>61</b>
<b>参考文献.....</b>	<b>63</b>
<b>致    谢.....</b>	<b>67</b>

# Contents

<b>Chapter 1 Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 A Brief Introduction for Seismic Tomography .....</b>	<b>1</b>
1.1.1 The Concept of Seismic Tomography .....	1
1.1.2 The Classification of Seismic Tomography .....	1
1.1.3 Present Defects of Seismic Tomography .....	2
<b>1.2 A Brief Introduction for The Development of Seismic Tomography .....</b>	<b>3</b>
1.2.1 The Development History of Seismic Tomography .....	3
1.2.2 The Development Status Quo of Seismic Tomography .....	5
1.2.3 The Development Trends of Seismic Tomography .....	7
<b>1.3 The Research Contents&amp;Importance of The Paper .....</b>	<b>7</b>
1.3.1 The Research Contents.....	7
1.3.2 The Importance of The Research Done in The Paper.....	8
<b>1.4 The Structure of The Paper.....</b>	<b>9</b>
<b>Chapter 2 The Theory Base for Seismic Tomography .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 A Brief Introduction for Seismic Tomography Inversion Problem .....</b>	<b>10</b>
2.1.1 The Mathematical Base for Seismic Tomography Inversion .....	10
2.1.2 The Universal Description for Geophysical Inversion Problem .....	11
2.1.3 The Solution for Seismic Tomography Inversion Problem.....	12
<b>2.2 A Brief Introduction for Seismic Tomography Inversion Methods.....</b>	<b>14</b>
2.2.1 Simulated Linear Inversion Methods .....	14
2.2.2 None-Linear Inversion Methods .....	15
2.2.3 Mixed Optimization Inversion Methods .....	17
<b>2.3 Summary.....</b>	<b>18</b>
<b>Chapter 3 Research on Seismic First Arrival Ray Tracing Algorithm..</b>	<b>19</b>
<b>3.1 A Brief Introduction for Ray Tracing Algorithms .....</b>	<b>19</b>
<b>3.2 Least Traveltime Ray Path Algorithm .....</b>	<b>22</b>
<b>3.3 A New Ray Tracing Method Based on Spectral Gradient Algorithm ....</b>	<b>23</b>
3.3.1 A Brief Introduction for SG.....	23
3.3.2 A New Ray Tracing Method Based on SG.....	24
<b>3.4 A Ray Tracing Method Based on CG .....</b>	<b>26</b>

3.5 Simulation Instances .....	27
3.6 Analysis for Simulation Results .....	32
3.7 Research on The Convergence Property of The Two Gradient Algorithms .....	32
3.8 Summary .....	33
<b>Chapter 4 Research on Seismic Tomography Inversion Methods Based on GA.....</b>	<b>35</b>
4.1 The Theroy Base for GA.....	35
4.1.1 The Principles of GA .....	35
4.1.2 The Basic Elements of GA.....	35
4.1.3 The Basic Operations of GA .....	36
4.1.4 The Main Steps of GA .....	37
4.2 A Cross-well Seismic Tomography Inversion Methods Based on GA....	38
4.2.1 A Description for The Inversion Problem .....	38
4.2.2 The Principles.....	39
4.2.3 The Main Steps.....	44
4.3 A CG Inversion Method.....	47
4.3.1 Objective Function&Its Gradient .....	47
4.3.2 The Main Steps.....	47
4.4 A Mixed Inversion Algorithm Based on GA&CG.....	48
4.5 Simulation Instances .....	49
4.6 Summary.....	54
<b>Chapter 5 The Design&amp;Implementation of The Seismic Tomography Software.....</b>	<b>55</b>
5.1 The Main Functions&Structure of The Software .....	55
5.2 The Design&Implementation of The Software.....	56
5.3 Summary.....	60
<b>Chapter 6 Conclusion&amp;Perspective .....</b>	<b>61</b>
<b>References .....</b>	<b>63</b>
<b>Acknowledgement .....</b>	<b>67</b>



## 第 1 章 绪论

### 1.1 地震层析成像简介

#### 1.1.1 地震层析成像的概念

地震层析成像是地球物理学科的一个研究领域,这项技术的产生及发展与计算机层析成像技术即 CT 技术(Computerized Tomography)密切相关。所谓计算机层析成像,就是指在不破坏物体结构的前提下,根据在物体外部获取的某种物理量的投影数据,运用数学方法,通过计算机处理,重建反映物体内部物理特征的图像<sup>[1]</sup>。自从 70 年代问世以来,CT 技术在医学及工业测试等领域得到了迅速的发展。到了 80 年代,这一技术进入到地学研究领域,称为地学层析成像(Geotomography)。地学层析成像是用医学射线 CT 的理论对地球内部进行探测的方法的总称,是一种详细调查地下物性参数分布状况的物探技术。根据传播物质的不同,地学层析成像的研究内容可以分为地震层析成像、电磁波层析成像和电阻率层析成像<sup>[2]</sup>。地震层析成像是地学层析成像中目前发展最为成熟的技术,是一种利用观测到的穿过地球内部的地震波的运动学和动力学特征,获得地震的破裂过程以及射线路径上介质物性信息的重要地球物理方法<sup>[3]</sup>。不同性质的岩石有不同的物理性质,地震波在通过岩石的时候,其振幅、相位(传播时间)、频谱都会发生变化,地震层析成像技术的关键就在于对这些变化进行处理以获得地下岩层的物性分布,进而推断出其地质构造。地震走时层析成像是地震层析成像的一个重要分支,它利用地震波在一定介质中传播的走时信息重建岩体中的波速分布。

#### 1.1.2 地震层析成像的分类

地震层析成像从不同的角度可以进行不同的分类:

- (1) 根据震源类型,可分为天然地震法和人工地震法;
- (2) 根据使用的地震波类型,可分为体波和面波方法;
- (3) 根据地震勘探中布局的方式,分为地表层析成像、井间层析成像、VSP 层析成像和逆 VSP 层析成像,其中井间层析成像方式的成像效果较好、分辨率高同时具备较高的信噪比,因而成为目前层析成像领域研究的重点;

(4) 根据所利用的数据类型分为反射层析、透射层析和折射层析, 其中透射层析的观测方式最接近于医学 CT 而且地震波走时也较为容易拾取, 因此是目前研究最为广泛的层析成像方式;

(5) 根据所利用的地震剖面上的属性的不同可以分为走时层析、波形层析和振幅层析。本论文重点讨论的是走时层析。

(6) 根据层析成像所利用的理论基础, 基本可分为基于射线理论的走时成像技术和基于波动方程的全波成像技术。

(7) 根据介质模型, 可分为水平层状、层状和任意非均匀, 或分为二维和三维成像方法, 其中针对非均匀介质的高分辨率的三维成像方法是目前地震层析成像领域的一个研究热点。

此外, 还有由上述各种方法相结合形成的联合反演方法, 例如走时反演与波形反演结合的走时-波形反演法等。

### 1.1.3 地震层析成像存在的问题

#### (1) 非线性问题

地震波在介质中的传播路径是弯曲的, 与介质的地震波传播速度有关, 而介质的地震波传播速度正是我们要求的未知量, 因此地震层析成像是一个非线性问题, 这就决定了我们利用计算机对目标区域进行层析反演的过程必然是一个反复迭代、逐步逼近的过程, 这必然需要耗费大量的计算时间和计算机存储空间。另外, 非线性反演的复杂性必然导致层析成像的多解性、低分辨率和不可靠性, 最后得到的结果也只是对目标区域相关物性参数的近似, 近似的程度则受到所采集到的数据、反演算法等多方面因素的影响。这些都限制了地震层析成像技术在实际工程中的应用。

#### (2) 有限视角问题

由 Radon<sup>[4]</sup>变换可知, 只有当所有投影角度的数据均已知, 才可以唯一地重建图像函数。但地球物理领域由于接收方式的限制, 投影角度十分有限, 无法做到全方位的观测。在地震勘探中, 震源点、接收点一般只在地面布置, 有条件的地方可在井间布置, 但不可能在成像区域的正下方布置。因此, 无论是近地表层析成像还是井间层析成像, 观测角度都是十分有限, 总是要丢失掉许多投影方向上的数据。这在客观上造成研究人员只能用不完备的数据重建图像, 进而导致图

象分辨率低,甚至可能无法用于分析研究。

### (3) 数据不均匀覆盖的问题

在地震层析成像中,如果不对不均匀覆盖的数据不进行处理,而直接进行层析反演计算,则这类数据会以一种不均匀且不可预测的方式使反演结果发生畸变<sup>[5]</sup>。数据的不均匀覆盖表明数据对不同模型参数的控制程度不同,而层析成像中最常用的常规 DLS(阻尼最小二乘)法定义所有的模型参数具有相同的权重,因而该方法忽略了数据的不均匀覆盖的影响, Wang and Braile<sup>[5]</sup>证明用忽略数据不均匀覆盖影响的 DLS 法得出的模型校正量正比于射线的覆盖程度,射线覆盖程度高的区域内的网格点被过分校正,而射线覆盖程度低的区域内的网格点校正量不足。造成数据不均匀覆盖主要有两方面的原因:一方面,与观测方式和数据采集的质量有关,如震源点之间不等距、接收点之间不等距、不同道的数据之间质量不同等等;另一方面,对每一炮而言,所有的射线都从震源点出发,因此在震源点处射线是非常密集的,而在远离震源点的地方,射线相对稀疏。另外,边界作用也会影响射线的覆盖方式:边界处数据的覆盖程度不足有可能影响工区的中间区域,使远离边界很大一段距离内的图象都发生畸变,对反演结果产生不利影响。此外,介质速度分布也会对射线的覆盖方式产生影响<sup>[6]</sup>。

### (4) 数据的不确定性

在地震层析成像中,能否精确定位炮点、检波点的空间位置,能否获取高信噪的地震信号,能否拾取到精确的地震波初至时间,都将对最后层析成像的结果产生重要影响。但受到实际观测条件的限制,测量所得的数据不可能是很精确的,测量误差的存在或其它因素的影响,都会使观测数据中含有不同类型或不同能量的噪音。这些噪音通常会导致反演迭代过程稳定性下降,进而影响成像结果的可靠性和分辨率。

## 1.2 地震层析成像的发展概况

### 1.2.1 地震层析成像的发展历史

地震层析成像物理是一个年青的学科,它起源于 20 世纪 30 年代。早期的地球物理勘探和地球物理方法从属于地质方法,通常是先由地质学家预测一个构造,再由地球物理学家用他们较为原始的勘探技术去验证这一构造。20 世纪 60 年代初期,美国科学家 Cormock 从数学和实验结果证实了根据 X 射线的投影可以

唯一地确定人体内部结构，从而奠定了医学诊断上图像重建的理论基础，即 X 射线 CT(X Ray Computer Tomography)。60 年代中期和 70 年代中期，随着数学图像重建方法在射电天文学和电子显微学等方面的应用和发展，在数学方法上出现了与 Radon 逆变换方法相同的褶积投影方法，Chapman<sup>[7]</sup>首先从理论上证明了地震学中的变换即是 Radon 变换。此后，地学界借助医学 CT 的思想，利用地震波的传播对地质结构开始进行半定量研究。从此，地震层析成像成为地球物理学研究的一个新领域。

地震层析成像的研究在 70 年代首先以井间速度结构为研究对象 (Boisetal,1972)<sup>[8]</sup>。1979 年，Dines 和 Lytle<sup>[9]</sup>首先将层析成像(Computerized Geophysical Tomography)这一名词用于论文的标题。1984 年，在亚特兰大召开的第 54 届地球物理勘探学家协会(SEG)年会上设置了地震层析成像研究专题，地震层析成像的研究在地震勘探领域得以发展。以 Daily<sup>[10]</sup>，Somerstein<sup>[11]</sup>，Bishop<sup>[12]</sup>，Dyer 和 Worthington<sup>[13]</sup>等人的研究为代表，这一时期研究工作的重点在于对数据处理与地震层析成像的方法理论研究，取得了一系列可喜的成果，射线追踪、空间域反演等不同于医学 CT 的方法得到快速的发展。其间，应用研究主要集中在地球深部结构成像领域。随着计算机工作站的发展，数字处理技术从二维向三维迅速过渡，得益于这项技术的发展，结合可视化技术，地球物理学家开始致力于重建清晰的地下介质结构的三维图象。海湾石油公司与美国加州大学合作，从 80 年代初期开始秘密利用反射数据重建地下速度结构，在 1984 年的 SEG 年会上首次公布了地震层析成像的研究成果，引起了轰动。同年，Anderson<sup>[14]</sup>用 CT 技术研究全球地质构造，并公布了全球三维速度结构。80 年代后期，美国国家技术研究所与加拿大多伦多大学在几个油田上作了跨孔地震层析成像试验。进入 90 年代，浅层地震层析成像技术开始进入到应用研究阶段，在工程勘探、资源勘探、岩体结构研究、环境保护、文物调查、防灾减灾等许多应用领域都得到实验性研究并取得有效的进展。国内外有大量文献记载了层析成像技术在工程与探矿中的应用问题，积累了许多宝贵的经验<sup>[3][15-18]</sup>。1992 年美国勘探地球物理学会第 62 届年会上，设立了专题讨论了高分辨率地震层析成像技术在工程与探矿中的应用问题。

中国科研人员也积极投身于地震层析成像领域的研究中。80 年代初期，金安蜀、刘福田等<sup>[19]</sup>首先对北京地区速度结构进行反演，地震层析成像技术开始在

中国得到研究和应用。十几年来,国内学者在中国各地区开展了很多有益的应用研究工作,取得了可喜的成果:徐果明等<sup>[20]</sup>、李红谊等<sup>[21]</sup>、何正勤和丁志峰等<sup>[22][23]</sup>、陈立华等<sup>[24]</sup>、孙若昧等<sup>[25]</sup>、李强等<sup>[26]</sup>在华北地区;丁韞玉等<sup>[27]</sup>、胥颐等<sup>[28]</sup>、丁志峰等<sup>[29]</sup>在西北地区;孙若昧等<sup>[30]</sup>、赵永贵等<sup>[31]</sup>、黄金莉等<sup>[32]</sup>、雷建设等<sup>[33]</sup>在西南地区;刘建华等<sup>[34]</sup>在华南地区;孙若昧等<sup>[35]</sup>、王椿镛等<sup>[36]</sup>、邵济安等<sup>[37]</sup>、宋仲和等<sup>[38]</sup>在中国邻近海域都作了大量的研究工作。他们的工作对地震层析成像在我国的应用研究以及对我国各地区地质构造的研究都起到了极大的推动作用。

总之,地震层析成像经过 20 多年来的发展,无论是在对全球、大陆、海洋、区域地质构造的研究中还是在石油、煤炭等资源的勘探开发以及工程地质等领域,都得到了广泛的应用,取得了丰硕的成果。但由于受到采集设备的限制,以及地下介质复杂性的影响,地球物理层析成像的理论和技術还未成熟,有待于进一步完善发展。

### 1.2.2 地震层析成像的研究现状

当前,许多国际重要学术会议和学术研讨班也都把对地震层析成像的研究列入会议和讨论班的主要内容之一,这极大地促进了该理论的发展及其在各个领域中的应用。对地震层析成像的研究主要集中在以下方面:

#### (1) 对地震层析成像中数据采集方式的研究

如前所述,根据地震勘探中布局的方式,地震层析成像主要可分为地表层析成像和井间层析成像。在地表层析成像中,震源点和接收点都在地表或近地表;而在井间层析成像中,震源点和接收点都在地下井间,如图 1-1 所示。层析成像本质上都是求 Radon 变换的逆变换,所采集数据是否完备,将从很大程度上影响到最后的成像效果。与地面方式相比,采用井间放炮井中接收的方式所采集的投影数据更加完备。同时,井间层析成像方式在分辨率上也优于地表层析成像(地表有较强的衰减作用,高频信号在通过地表时被吸收,从而在一定程度上降低了最后成像的分辨率)。另外,相对于地表方式,井间方式还具备能量传播距离短、接近探测目标、避开低速带、信噪比高、初至波走时拾取更为简单等优势。因此,在地震层析成像中,目前较为常用的是井间采集方式<sup>[39]</sup>。

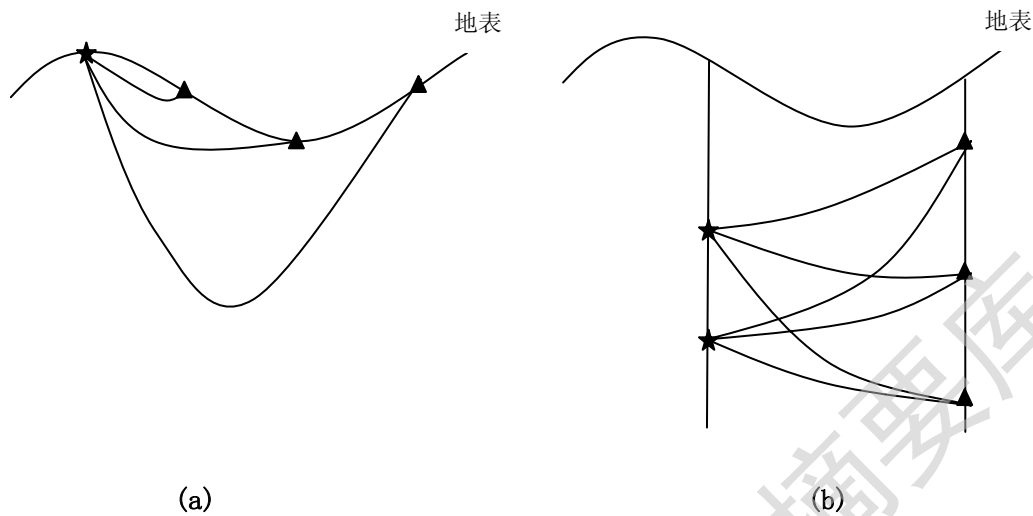


图 1-1 地震层析成像数据采集方式

注：(a) 地面地震方式；(b) 井间地震方式；★为震源点，▲为接收点。

## (2) 对地震层析成像中正演方法的研究

在地震层析成像中，正演与反演是最为关键的两个步骤，正反演算法的精度和效率直接影响到最后层析成像的效果。其中，正演是反演的基础。目前，地震层析成像中的正演方法主要有两大类：基于几何地震学的射线正演模拟和基于波动地震学的波场正演模拟。射线模拟是从射线概念出发，计算地震波在介质中的传播时间、射线路径以及射线振幅。波场模拟则是利用波动方程计算相应的地震波场。本文主要讨论的是基于射线理论的正演模拟。射线模拟可进一步划分为运动学射线模拟和动力学射线模拟。运动学射线模拟是从运动学角度模拟地震波传播，只计算地震波走时和射线路径。动力学射线模拟则还需考虑地震波传播的动力学特征，计算射线振幅。运动学模拟主要用于走时层析成像而动力学模拟则可用于波形层析成像<sup>[40]</sup>。本文重点讨论前者。目前基于射线理论的正演方法主要有：试射法、弯曲法、程函方程法和最小走时射线路径算法<sup>[41]</sup>，我们将在论文第 3 章分别予以介绍。

## (3) 对地震层析成像中反演方法的研究

反演问题是层析成像技术的核心内容，也是近三十年来地球物理研究的热点问题之一。20 世纪 60 年代末，Backus 和 Gilbert 以求取最佳分辨率为出发点，发展了一套反演方法，人们称之为 BG 方法<sup>[42]</sup>。随着线性及非线性规划、广义逆理论、信息论、非线性动力学、遗传算法及最优化方法等现代数理及仿生学工具

的引入, 地球物理反演研究在理论和方法上均取得了重大进展。20 世纪 80 年代以来, 基于近似的思想和方法, 建立起了以迭代方法为基础的优化反演方法, 用于在无法求得解析解时求取反演问题的近似解或最优解。这种求优化解的方法主要分为两类: 局部寻优方法和全局寻优方法。其中, 全局优化方法主要有: 基于计算数学中的成熟方法(如: 梯度、泰勒公式、运筹学、优选法)而建立起来的各种全局寻优方法, 如: 试探法中的平分法、黄金分割法、Fibonacci 搜索法以及基于生物进化理论的遗传算法、基于统计物理学(统计力学)的模拟退火算法; 而局部寻优方法主要有: 最速下降法、Gauss-Newton 法、共轭梯度法和可行方向法等。

### 1.2.3 地震层析成像研究展望

纵观层析成像 20 多年来的发展历程, 可以发现, 大多数层析成像方法的介质模型都以二维、单一布局方式、各向同性为主; 而在未来, 介质模型将会向各向异性、粘弹性、多相态方向发展, 同时也将从以二维为主过渡到以三维为主, 与实际地球介质越来越接近<sup>[43-46]</sup>。在数据采集方面, 多种观测系统并存可能会持续相当长的一段时间, 从单一观测方式向同时使用多种观测方式将是未来的发展趋势。在所使用的数据类型方面, 随着射线层析的发展接近成熟, 并已在工业中得到应用, 层析成像的研究重点将逐渐向绕射层析转移, 在利用运动学信息的同时, 还将利用动力学信息。在正演模拟方面, 探索更精确、更高效、更稳定的模拟方法将是未来研究工作的重点; 在反演方法方面, 随着应用研究的深入, 待解决问题越来越复杂, 单一物探方法的反演工作已不能完全适应实际应用的要求, 采用多种数据的联合反演, 把单一地球物理资料的反演变为反映各种不同地球物理场的联合反演, 从多方面把握运动性质, 以求更合理地解释运动过程, 这是目前地球物理反演的总趋势, 也是发展的必然<sup>[46]</sup>。

## 1.3 本论文的研究内容和意义

### 1.3.1 研究内容

本论文以作者参与合作的由厦门大学电子工程系承担的“复杂介质初至波层析成像方法技术研究”项目的部分内容为背景。主要研究内容包括:

1. 研究现有的地震初至波射线追踪算法, 并提出新的射线追踪算法, 以提

高层析反演过程中正演模拟的精度。

2. 研究现有的井间地震走时层析成像方法，并提出新的走时层析反演方法以提高井间介质速度分布重建图像的分辨率和可靠性。

3. 以新算法和具代表性的传统算法为基础，编制二维走时层析成像软件。

以前两项内容为核心，我们进行了相关的理论方法研究，提出了新的射线追踪算法和走时层析反演方法，并且利用 Visual C++ 6.0 开发了相应的层析成像软件，通过大量的仿真实验，对新旧算法进行对比研究。仿真结果验证了新算法的优越性，也体现了所研制软件的性能和实用价值。

### 1.3.2 研究意义

(1) 射线追踪即正演模拟，它是地震层析成像过程中的重要步骤，是反演的基础。射线追踪算法的精确性和效率直接影响到层析成像方法整体的精确性和效率。目前较为常用的几种追踪算法如最小走时射线路径算法在精确性和效率上都存在缺陷，在实际应用中有一定的局限性，亟待改进。因此寻求一种更精确、更高效的射线追踪算法对于地震层析成像技术的发展来说具有重大意义。

(2) 井间地震层析成像技术以其较高的成像分辨率和较高的信噪比，成为目前层析成像领域研究的热点；它可以用来更好地描述井间地层和构造分布，也可以用于寻找未知储层、检测流体等等。但目前常用的一些局部优化反演方法如共轭梯度法等，都需要计算目标函数梯度，容易陷入局部极值；而一些全局优化算法如遗传算法、模拟退火算法等，收敛速度较慢、计算量巨大；如何将两类方法有效的结合起来，克服彼此的缺陷，并将其应用于地震层析反演，提高反演成像的效率和分辨率是值得研究的一个问题。

(3) 地震层析成像是一个计算量大、耗时漫长的过程，这个过程可以采用多种不同的正反演算法，不同的正反演算法组合方式又形成多种不同的层析成像方法。为了能够对不同层析成像方法在不同介质速度模型下的性能进行对比研究，进而将其应用于实际工程领域，编制了一个能对不同介质模型和正反演算法进行有效管理、对整个成像过程进行可视化监控的层析成像软件，是一个极具实际意义的课题，一个好的层析成像软件将是相关领域科研人员和工程勘探人员的得力助手。



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库